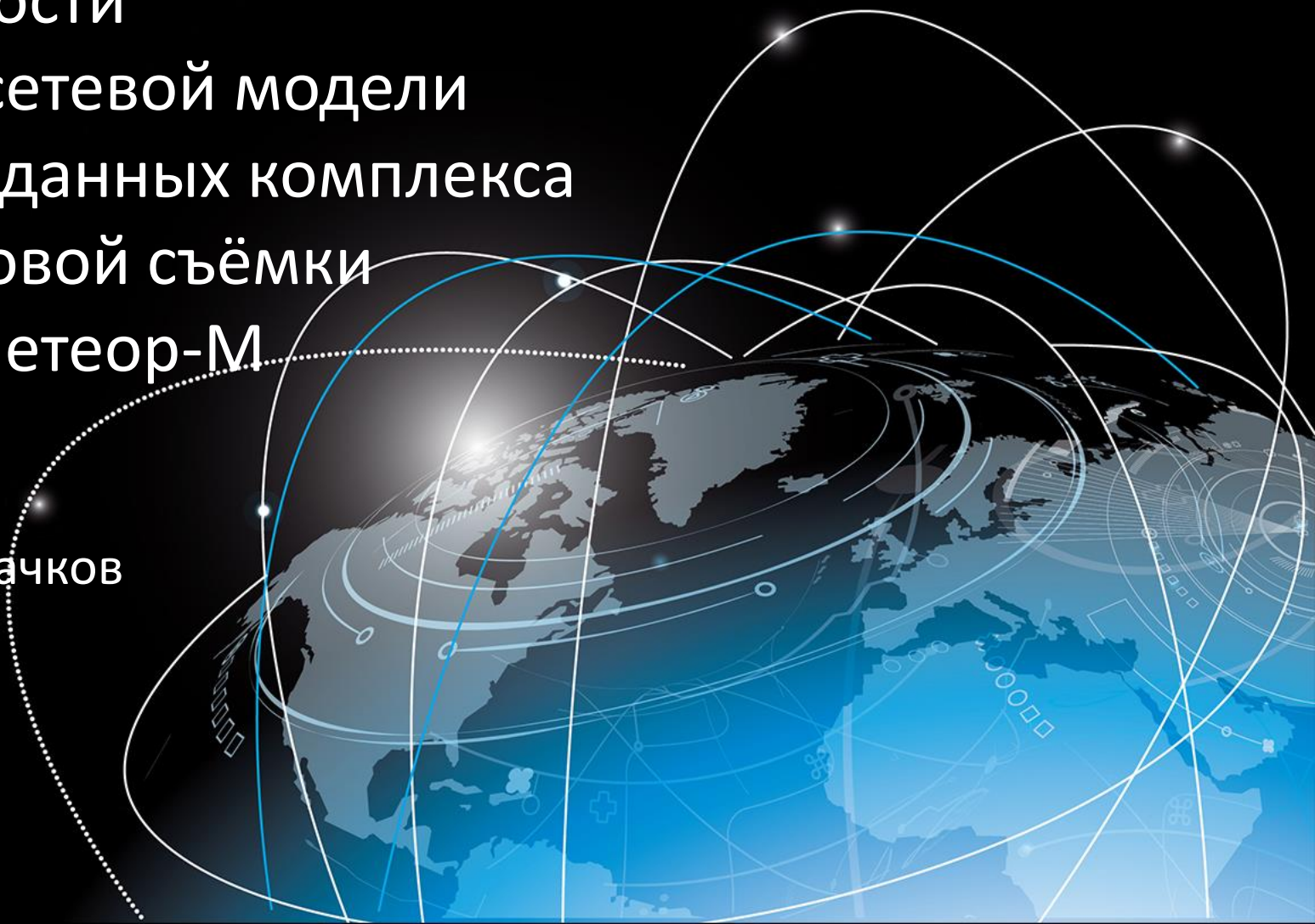




РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

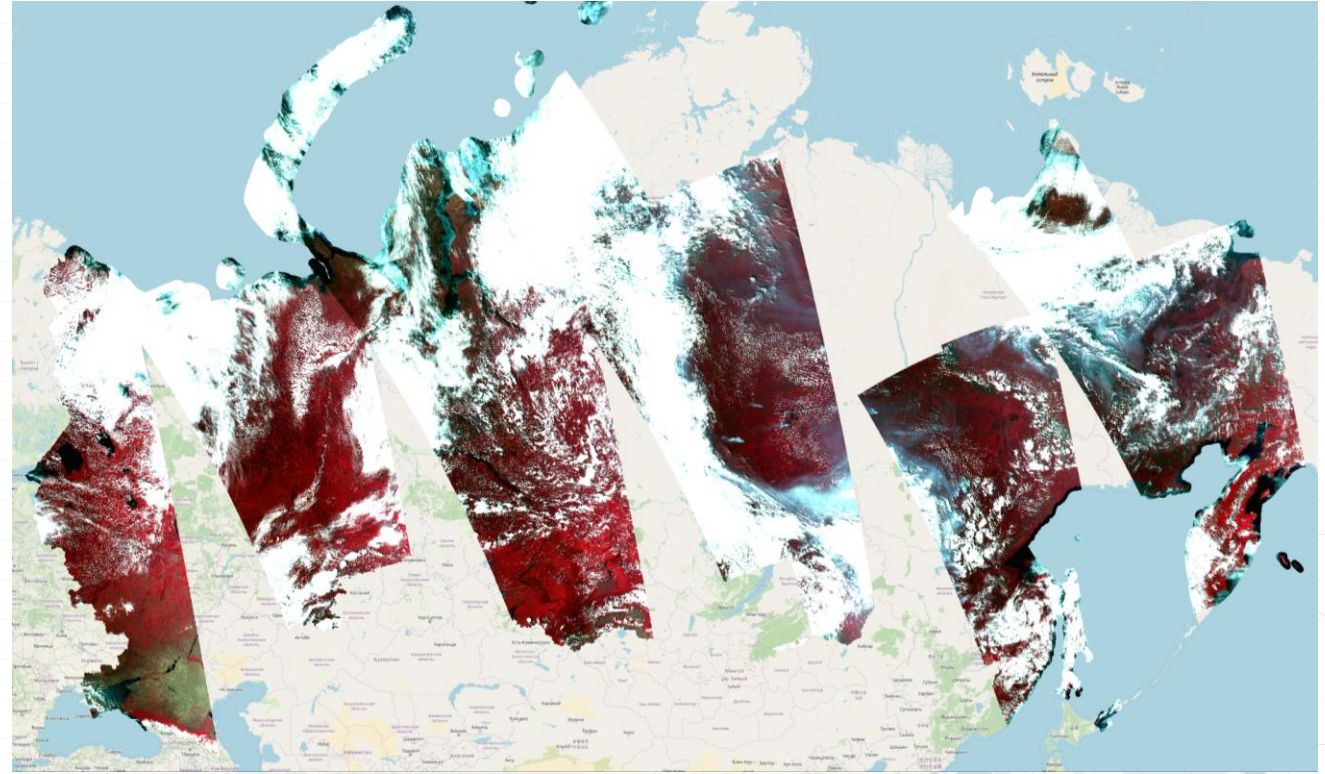
Исследование применимости мультимодальной нейросетевой модели TerraMind для обработки данных комплекса многозональной спутниковой съёмки космического аппарата Метеор-М

А.И.Васильев, А.А.Акимов, А.М.Скачков



Актуальность задачи сегментации

- **Оперативные задачи ДЗЗ:**
суточные мозаики РФ,
мониторинг паводков/ледовой обстановки/пожаров.
- **Ключевой этап предобработки:**
облачная маска нужна для отбора сцен, радиометрической нормализации и бесшовного слияния; водная маска — для тематических продуктов



Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на территорию РФ (13.07.2025)

Цель - оценить применимость TerraMind к мозаикам КМСС («Метеор-М») для сегментации **облаков** и **воды** в потоке суточной сборки мозаик.

Задачи

- Сопоставить результат работы **TerraMind** и **ResNet (КМСС)**
- Исследовать влияние **масштаба тайла** и **нормализации** на качество.
- Разработать и верифицировать ансамбль **TerraMind–ResNet**; сформулировать **рекомендации по применимости**.

- **Доменный сдвиг:** TerraMind обучалась на мультимодальных данных с доминированием Sentinel-1/2 (напр., Sen1Floods11); спектр и разрешение КМСС иные → нужна проверка переносимости.
- **Вариативность данных:** сезоны; снег/лёд; тени облаков; блики воды; тонкая/перистая облачность.
- **Разметка:** ограниченный и неоднородный объём; дисбаланс классов («облака»/«вода»).
- **Условия исследования:** фиксированный конвейер мозаик; рассматриваем только классы «облака» и «вода»; TerraMind используется без дообучения на КМСС.

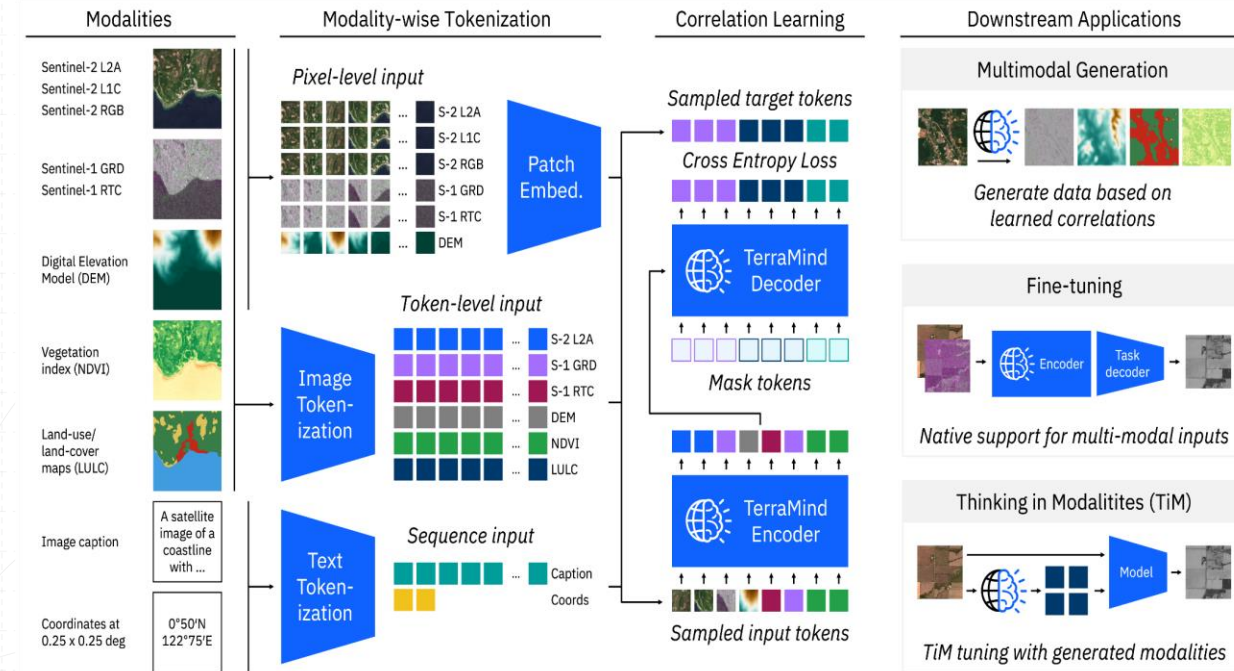
СРАВНЕНИЕ

КА «Метеор-М» № 2-4 И КА Sentinel-2

Параметр	КМСС («Метеор-М»)	Sentinel-2 (MSI)	Последствие для переноса
Спектральные каналы	NIR, Red, Green	Nir, Red, Green Coastal aerosol, Blue, Green, Red, Red Edge 1, Red Edge 2, Red Edge 3, NIR (широкий), NIR (узкий), Water Vapour, Cirrus, SWIR 1, SWIR 2	Меньше признаков → ниже разделимость классов
Разрешение (GSD)	60 м	10/20/60 м (в зависимости от канала)	Важен подбор размера тайла и ресемплинга
Радиометрия/битность	Иная шкала DN/калибровка	Стабильная калибровка	Нужна нормализация
Индексы/вспом. каналы	NDVI возможен, NDWI/облачные индексы ограничены	NDVI/NDWI и др. доступны	Использовать прокси-признаки или каскад (грубый→уточняющий)

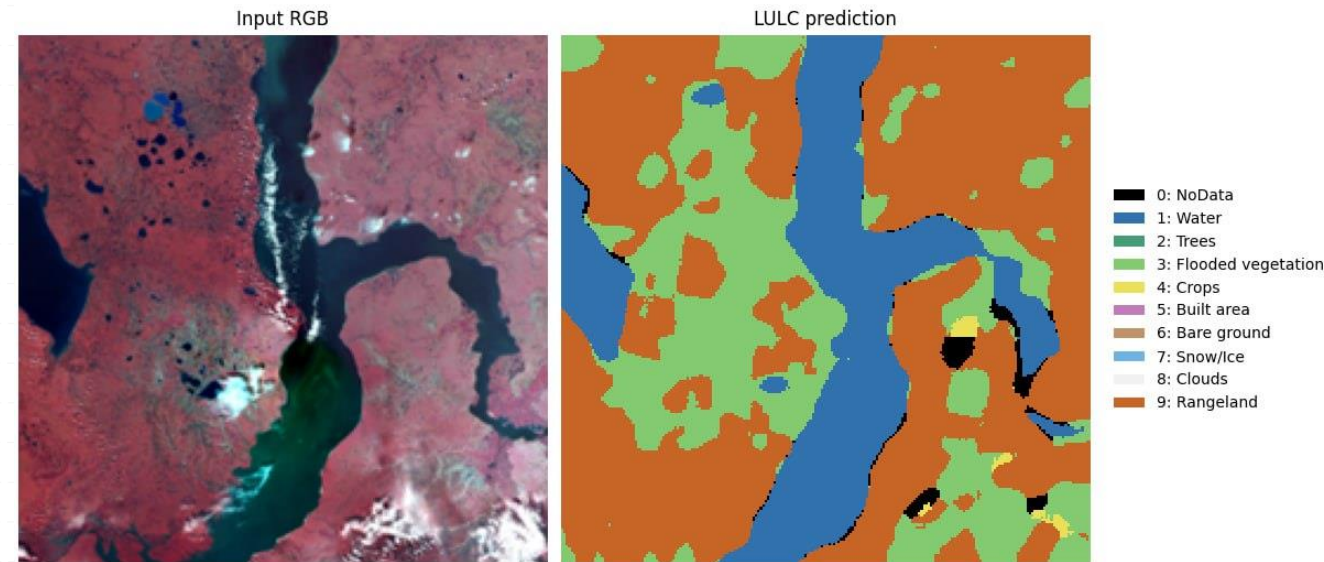
Архитектура Terramind

- **Класс модели:** any-to-any генеративная мультимодальная foundation-модель для ДЗЗ; несколько версий.
- **Ключевая идея:** двухмасштабное предобучение (пиксели + токены) → лучшая переносимость между задачами/модальностями.
- **Модальности предобучения:** Sentinel-2 (оптика), Sentinel-1 (радар), DEM, NDVI, LULC, текст, координаты.
- **Особенность:** Thinking-in-Modalities (TiM) — дозаполнение недостающих модальностей при fine-tune/инференсе.
- **Наш режим:** zero-shot на КМСС, без дообучения; вход — G/R/NIR-тайлы, единая нормализация; пороги — по валидации на КМСС.



Применение Terramind к данным КА «Метеор-М» № 2-4

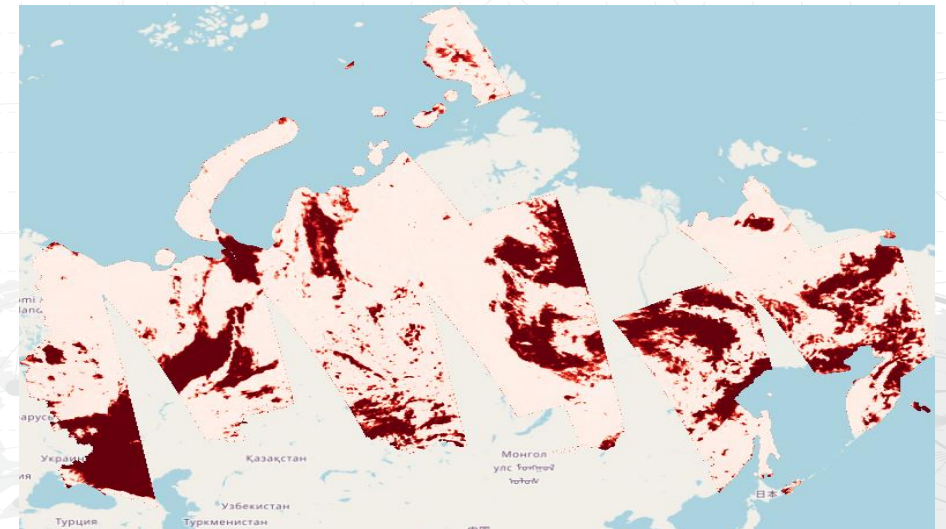
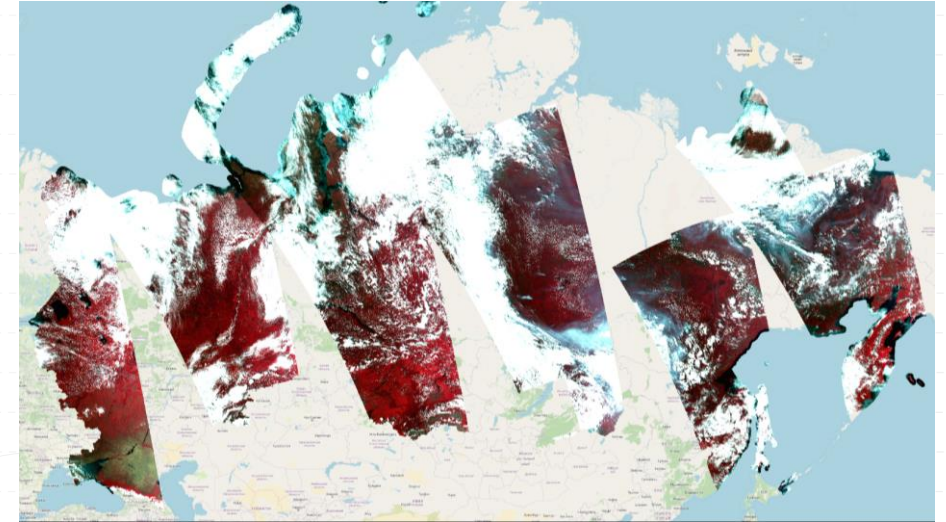
- **Условия:** zero-shot, без дообучения и радиометрической нормализации;
Наблюдение: высокая полнота, но много FP; сильная зависимость от размера тайла.
- **Нестабильность:** метрики «плавают» между сценами (сезон, освещённость, угол Солнца).
- **Типичные ошибки:** перистые/тонкие облака, облачные тени; блики на воде; снег/лёд путаются с облаками/водой.
- **Вывод:** подходит как **грубый детектор**, но без нормализации и каскада даёт избыточные FP и неточные границы.



Результат работы TerraMind (без нормализации)
на фрагменте данных КМСС

Модель — ResNet-101 cloud

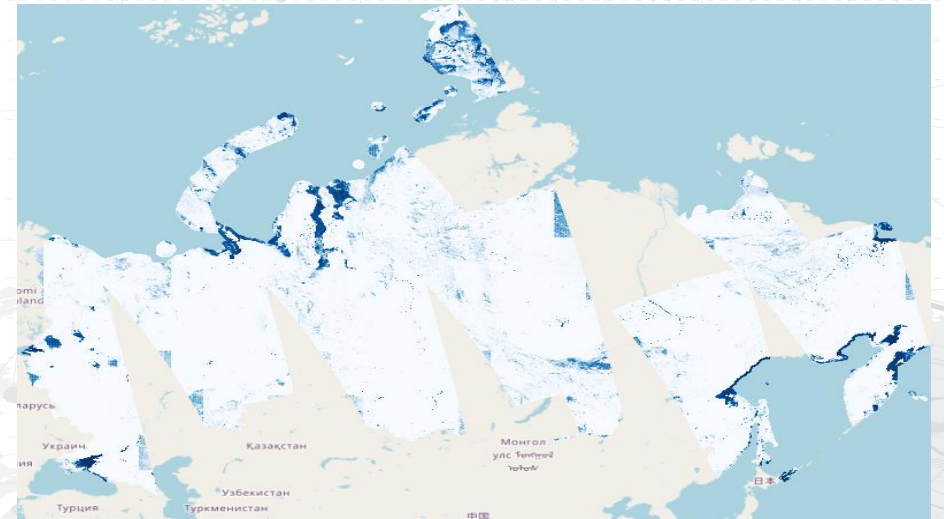
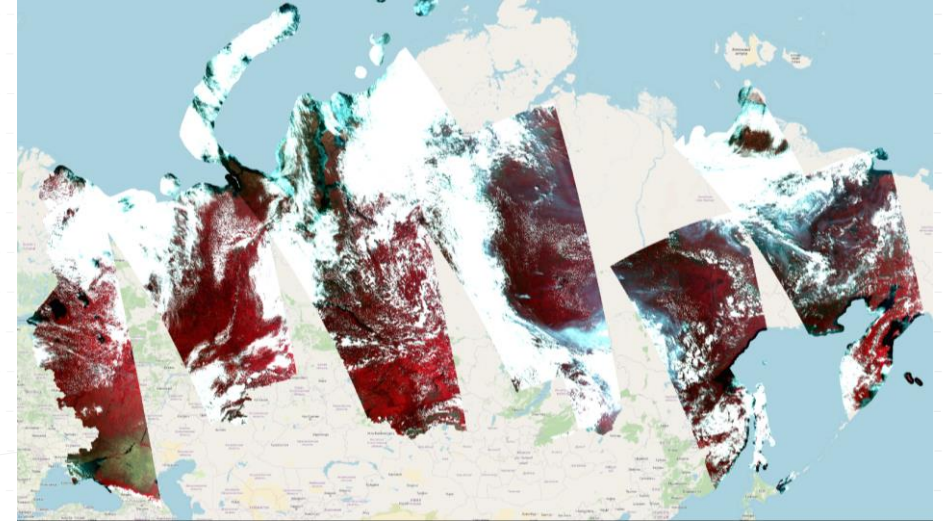
- Архитектура: **ResNet-101** (сегментация облаков).
- Данные: **ручная разметка КМСС**.
- Объём обучения:
 - **70 000 тайлов, 4 эпохи, ~12 ч.**
- **Метрики**
 - Accuracy: **0.9103**
 - F1-score: **0.7888**
 - IoU: **0.7331**
- **Техпроцесс**
 - Предобработка: нормализация по квантилям.
 - Аугментации: освещённость, зеркалирование и повороты.
 - Сплиты: контроль сезонности/регионов.
- **Минусы нашего решения**
 - Генерализированная маска облачности
 - Ошибки разделения снег\вода



Результат маскирования облачности ИНС
RESNET-101

Модель — ResNet-101 water

- Архитектура: **ResNet-101** (сегментация водных объектов в т.ч. наводнений).
- Данные: **ручная разметка КМСС**, а также данные **DeepWaterMap**.
- Объём обучения:
 - **150 000 тайлов, 5 эпох, ~25 ч.**
- **Метрики**
 - Accuracy: **0.99**
 - F1-score: **0.91**
 - IoU: **0.89**
- **Техпроцесс**
 - Предобработка: нормализация по квантилям.
 - Аугментации: освещённость, зеркалирование и повороты.
 - Сплиты: контроль сезонности/регионов.
- **Минусы нашего решения**
 - Ошибки поиска небольших водных объектов



Результат маскирования водных объектов
ИНС RESNET-101

Независимые модели: формируют вероятностные карты для классов *cloud* и *water* на одних и тех же тайлах КМСС.

Итоговая карта класса: взвешенное сложение

$$Pred_{final} = \sum_{i=1}^M w_i Pred_i$$

Где:

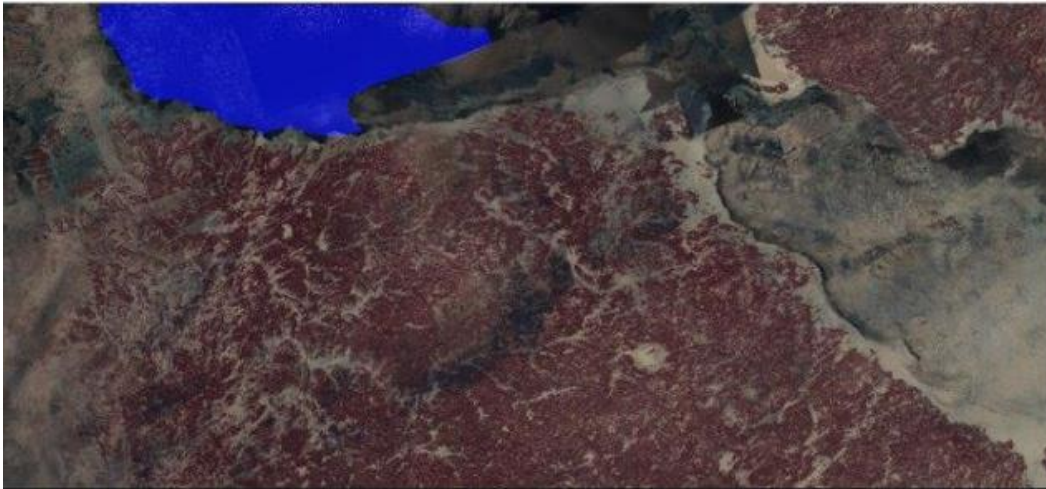
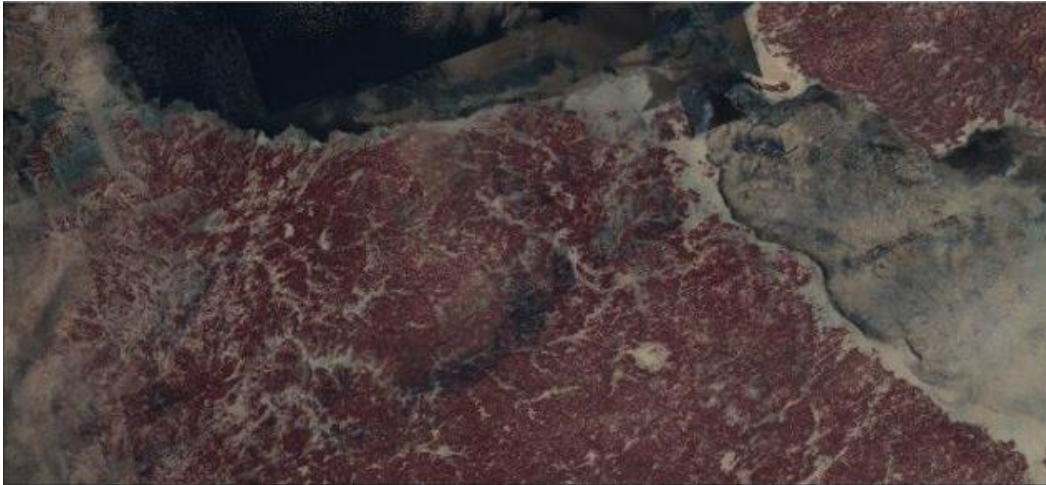
- $Pred_i$ — вероятностная карта i —й модели (в диапазоне $[0,1]$).
- w_i — вес i —й карты (задаётся по классу/сезону/региону).
- M — число карт в ансамбле.
- $Pred_{final}$ — итоговая (ансамблированная) вероятностная карта.

Плюсы подхода: управляемый баланс полноты/точности без изменения архитектур;
простая настройка и воспроизводимость.

Данные и охват эксперимента

- **Источник:** мозаики КМСС (КА «Метеор-М» №2-4), суточная съёмка.
- **География/периоды:** регионы РФ, несколько сезонов (лето/осень/зима/весна).
- **Единица инференса:** тайл 512*512 пикселей с различным пространственным разрешением.
- **Контроль качества:** выборочная валидация оператором.

МЕТРИКИ (ВОДА)

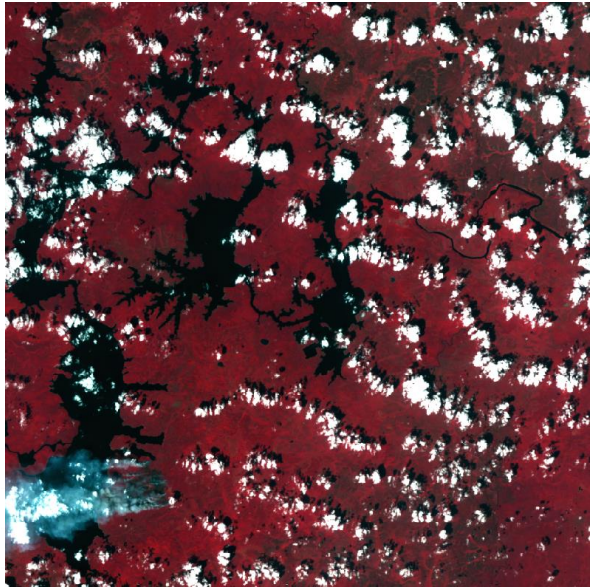


Для оценки метрик взята сложная
снежная сцена

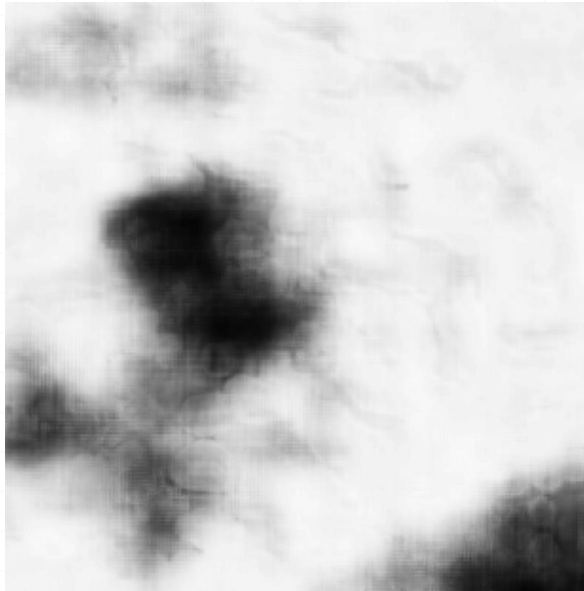
	Accuracy	F1 Score	IoU
Terramind	0.84	0.38	0.24
ResNet101	0.86	0.49	0.32
ResNet101_v2	0.97	0.77	0.63
Ансамбль	0.977	0.80	0.68

Важно отметить, что была взята
сцена из обучающей выборки для
обоих моделей ResNet!

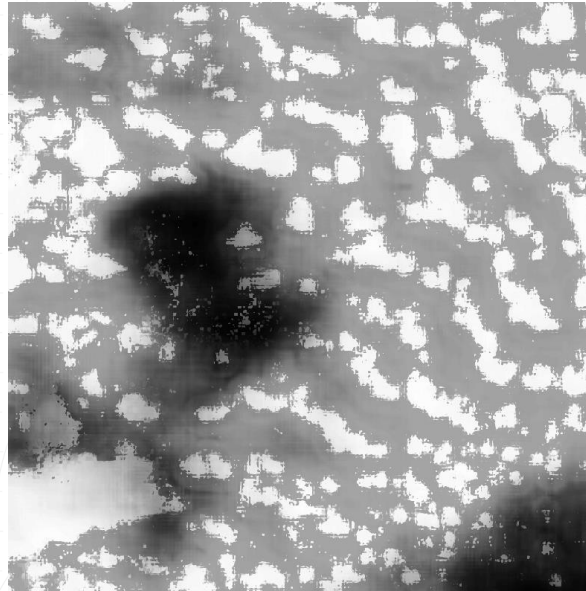
Примеры работы сегментации облачности



Исходный снимок КМСС
Вилуйское
водохранилище
(62.924143, 110.858367)



Результат работы ИНС
ResNet-101

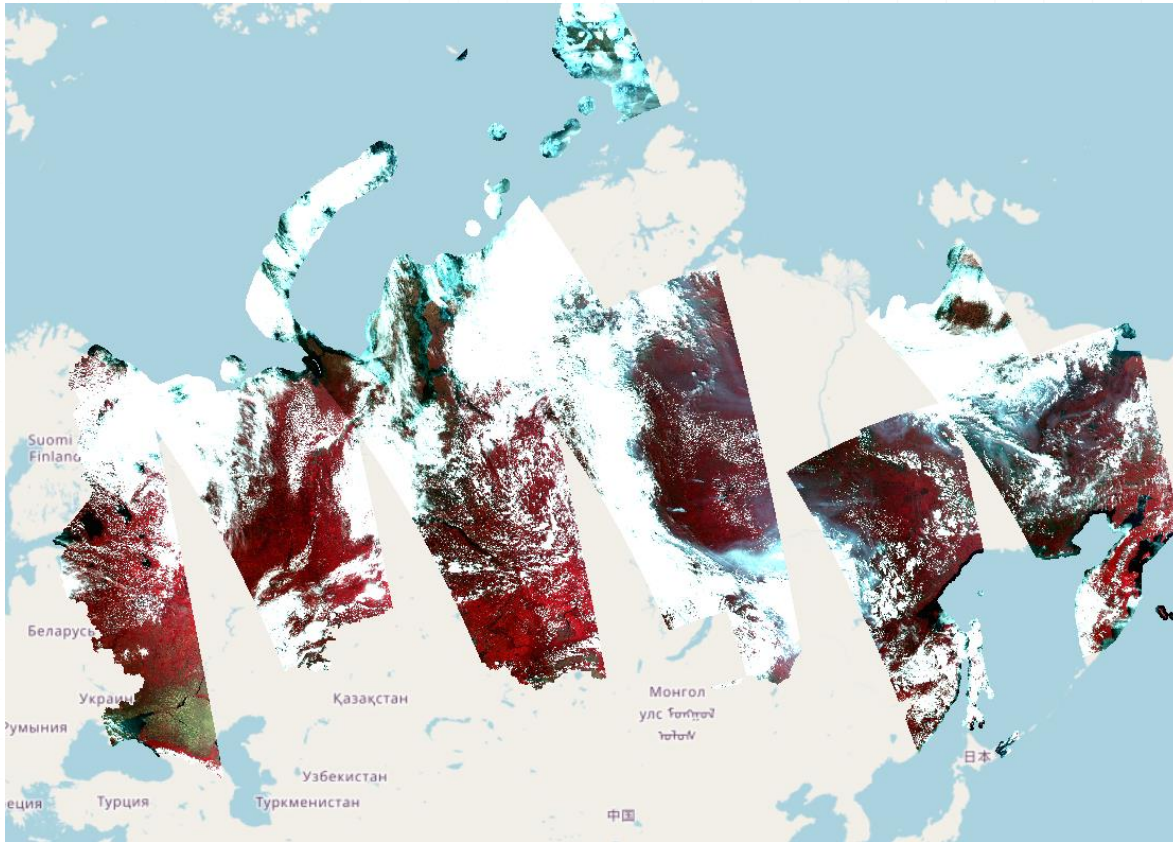


Результат работы
TerraMind

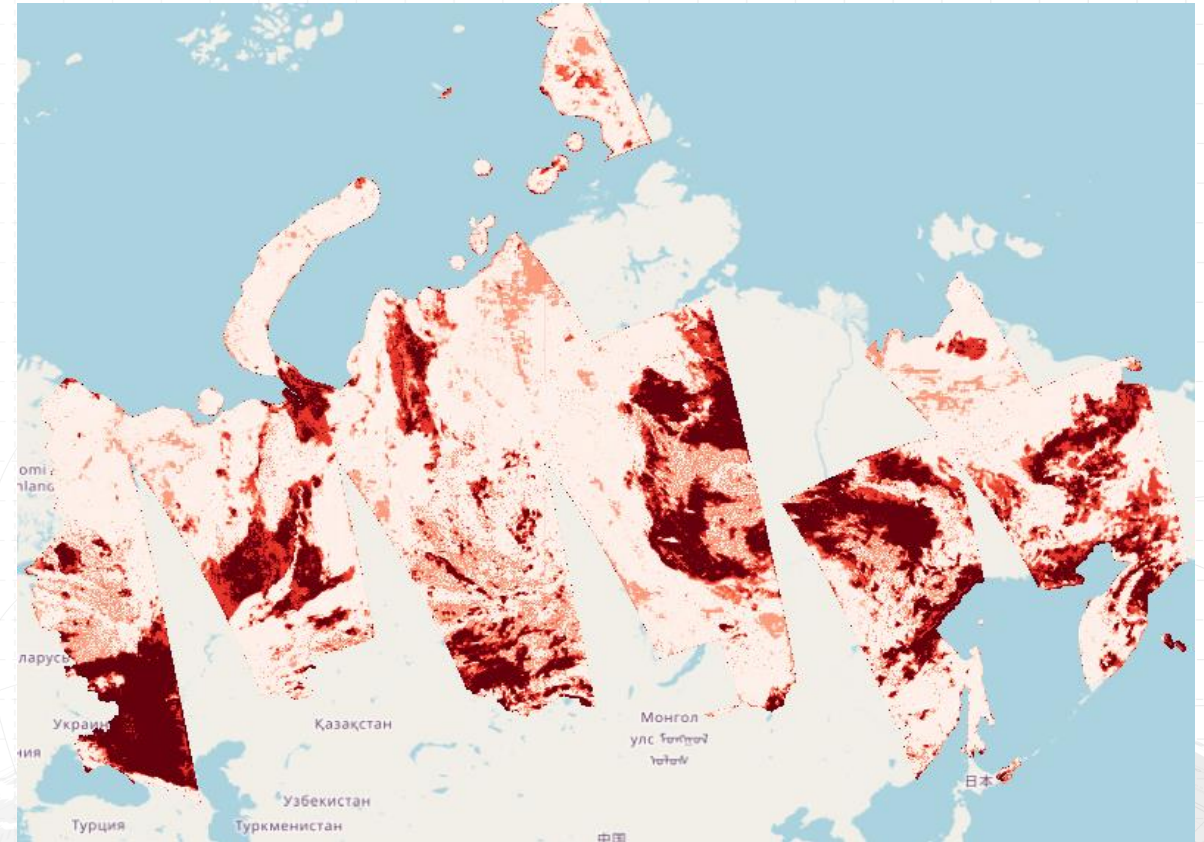


Объединённый результат
работы ResNet и TerraMind

Примеры работы сегментации облачности

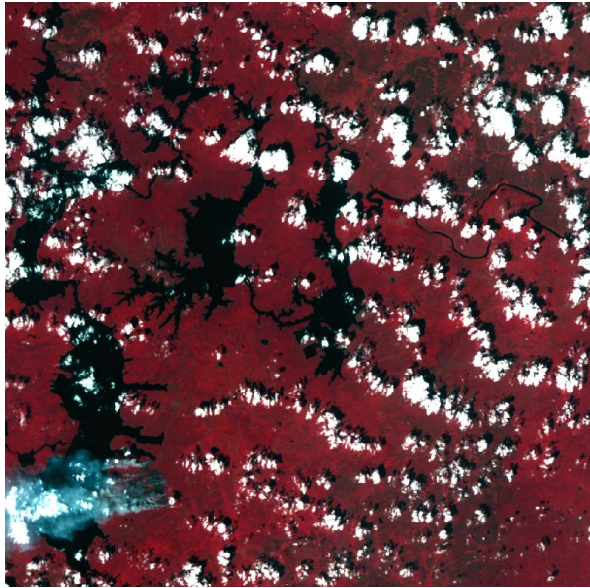


Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на территорию РФ (13.07.2025)

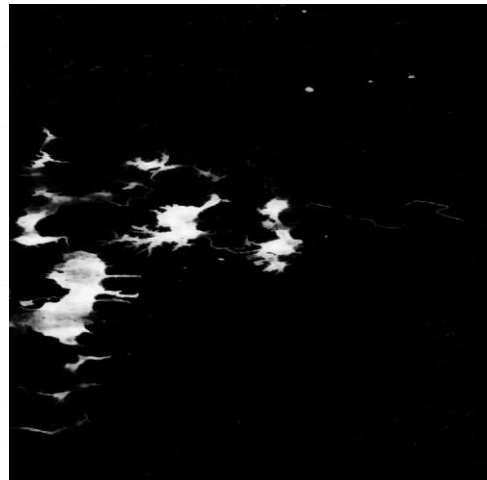
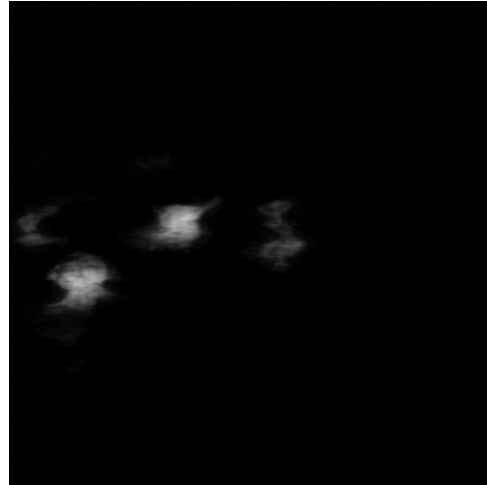


Результат маскирования облачности ансамблем ИНС

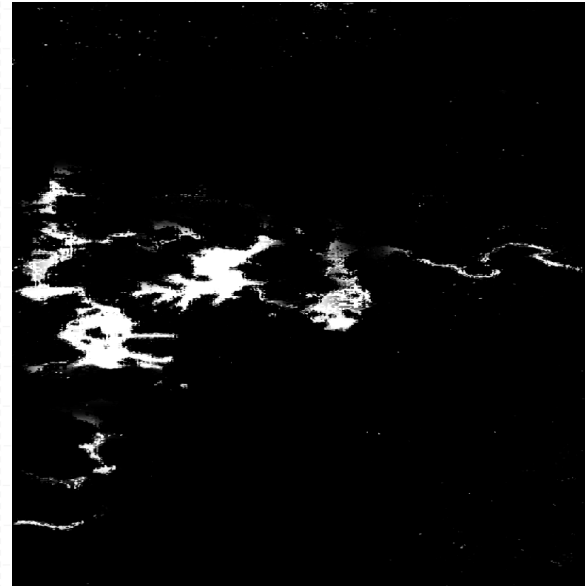
Примеры работы сегментации воды



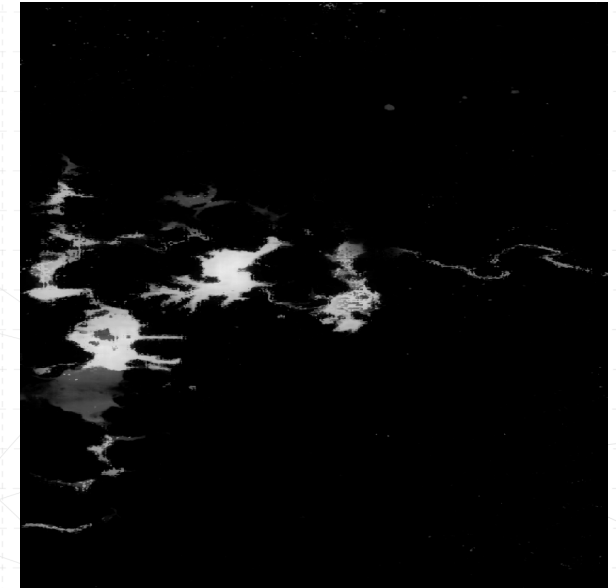
Исходный снимок КМСС
Вилуйское
водохранилище
(62.924143, 110.858367)



Результат работы ИНС
ResNet-101

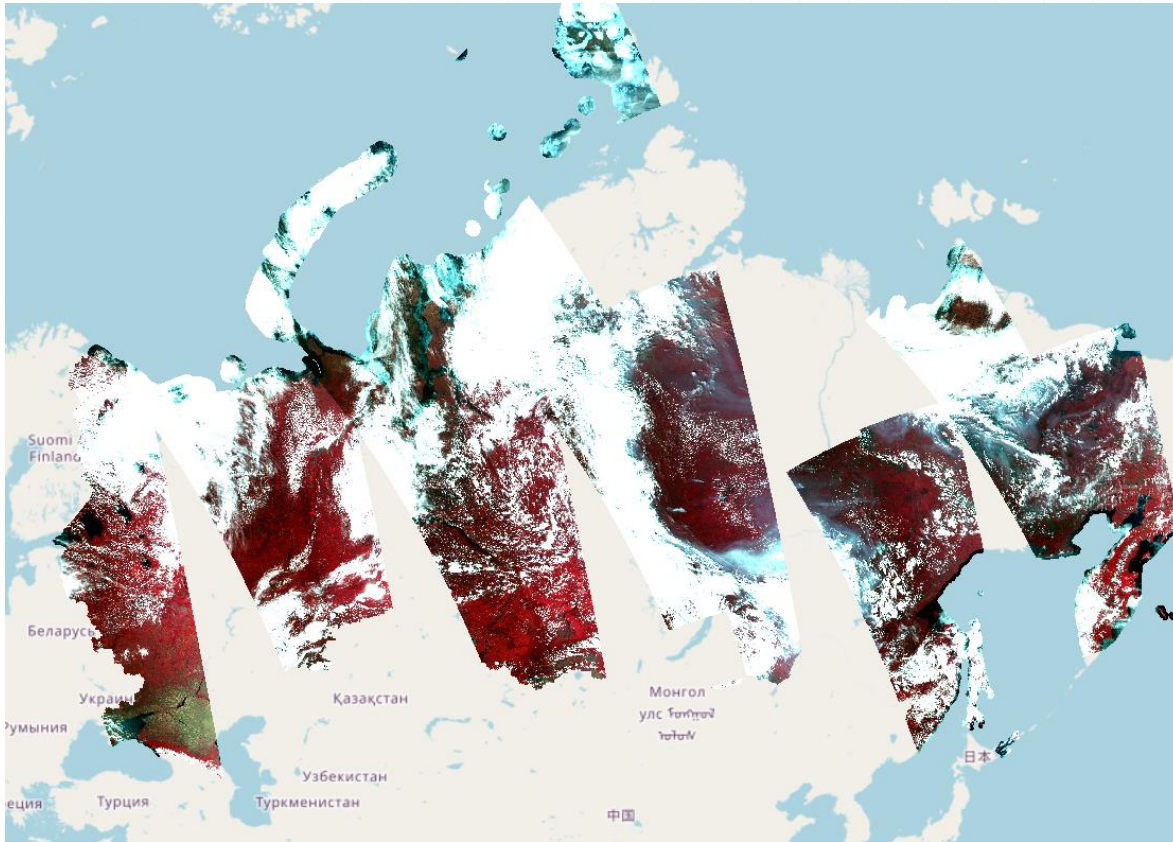


Результат работы
TerraMind



Объединённый результат
работы ResNet и TerraMind

Примеры работы сегментации воды



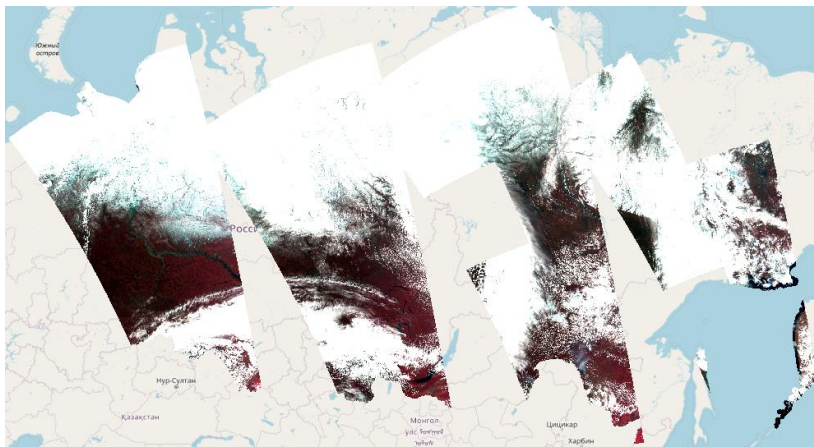
Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на территорию РФ (13.07.2025)



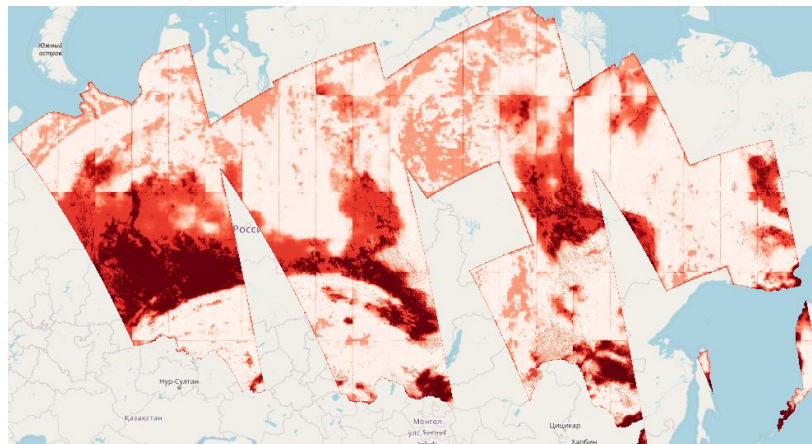
Результат маскирования воды ансамблем ИНС

Примеры работы

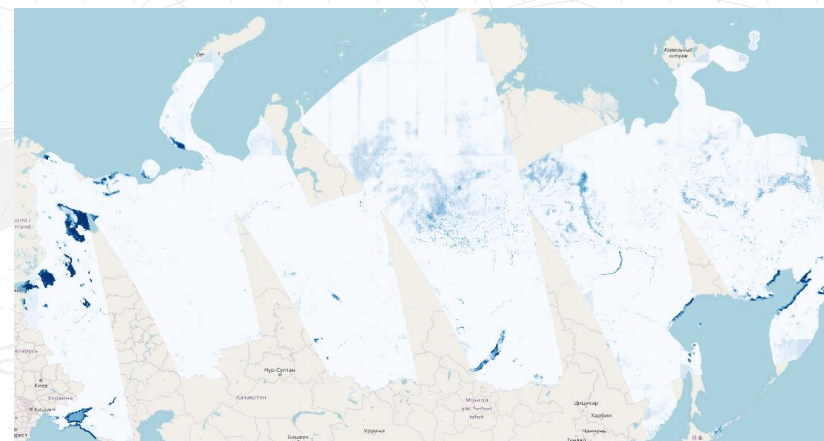
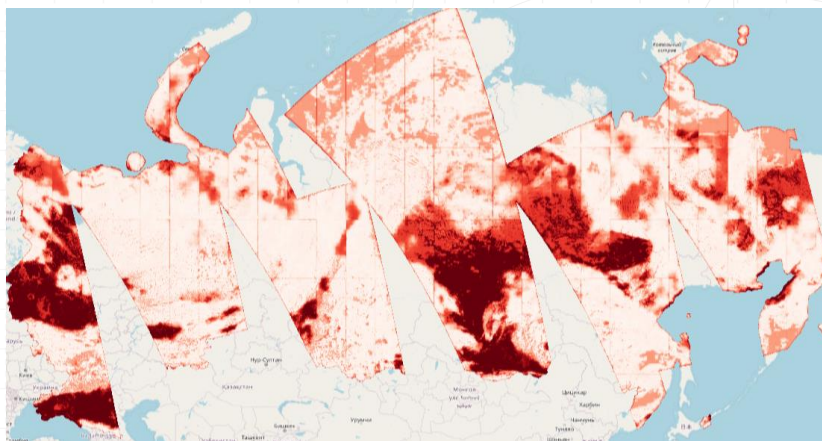
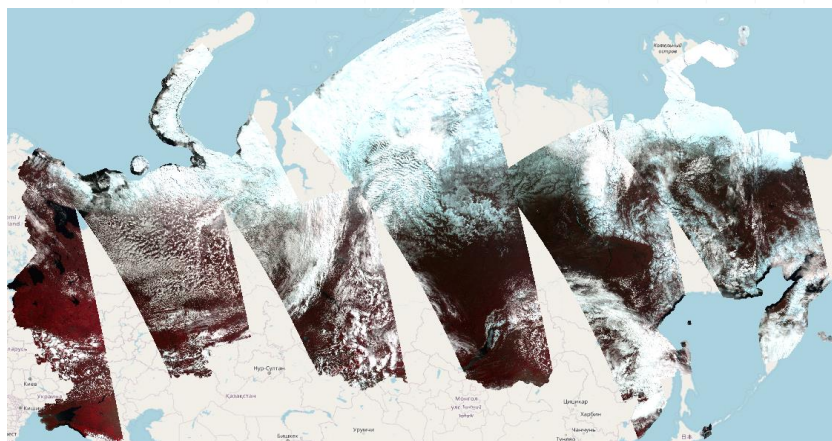
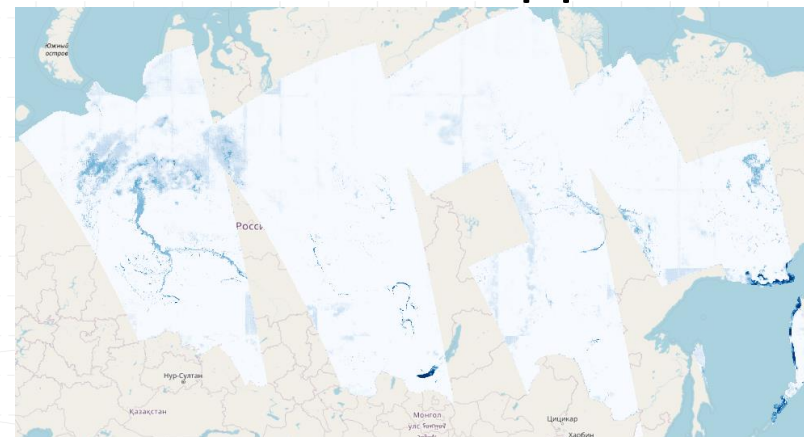
Исходная мозаика



Маска облачности



Маска воды



Ограничения эксперимента

- **Ограниченность набора данных**, а также неоднородность по регионам/сезонам; **дисбаланс классов**.
- **Состав классов**: только **облака** и **вода** (без теней/снега/льда).
- **Доменная адаптация**: TerraMind — **без дообучения** на данных КМСС (новая модальность).
- **Радиометрия**: вариативность параметров съёмки/освещения не всегда полностью компенсируется.

- **Применимость:** после радиометрических и масштабных нормализаций TerraMind корректно переносится на данные КМСС.
- **Качество без дообучения:** TerraMind демонстрирует уверенное качество сегментации и может служить **базовой zero-shot моделью** для задач ДЗЗ.
- **Устойчивость:** снижено число ложноположительных срабатываний; поведение стабильнее по сезонам и регионам.
- **Практическая ценность:** повышается качество сегментации на суточных мозаиках и тематических продуктах, уменьшается объём ручной корректировки.

- **Дообучение TerraMind под КМСС:** добавить поддержку NRG (NIR–Red–Green) как новой модальности и обучить под наши данные.
- **Больше классов:** включить тени, снег/лёд, считать метрики по каждому классу отдельно.
- **Новая нормализация:** разработать схему, учитывающую сезонность, угол Солнца и прочие факторы.
- **Автоподбор настроек ансамбля:** автоматически подбирать веса и пороги для регионов/сезонов по валидации.
- **Расширение охвата эксперимента:** масштабировать эксперименты с российских мозаик на глобальные покрытия.

Заключение

Проведено применение **TerraMind** на данных **КМСС**; с реализованной **радиометрической** и **масштабной** нормализацией; собран **ансамбль** с нашими моделями **ResNet-101** и **TerraMind** (взвешенное сложение вероятностных карт).

Эксперименты:

- **Zero-shot TerraMind** на КМСС (без дообучения).
- **ResNet-101** на ручной разметке КМСС для задач сегментации **воды** и **облачности**.
- Исследование влияния **размера тайла** и **нормализации**.
- **Ансамбль TerraMind + ResNet-101** с подбором **весов** и **порогов** по валидации.

Результаты:

- После нормализаций **TerraMind** применим и стабилен на данных КМСС (zero-shot).
- **ResNet-101** обеспечивает высокую точность на доменных данных.
- **Ансамблирование** (взвешенная сумма) повышает итоговую точность сегментации.